



# 역학적기법에 의한 콘크리트 포장슬래브의 덧씌우기 보강두께 산정

이 승 원\*

## 1. 서 론

콘크리트 포장슬래브는 내구성과 경제성 그리고 실용성면에서 우수함이 입증되어 고속도로 및 일반 국도, 공항등의 공사에 사용이 급격히 증가하고 있고 고속도로의 경우 절반이상의 구간이 콘크리트 포장슬래브로 건설되어 있다. 그러나 현재 교통량이 급속도로 증가하고 차량이 중량화되어 기존의 상용중인 콘크리트 포장슬래브의 파손 및 구조적 기능저하가 가중되고 있으며, 일부 구간의 경우에는 조만간 설계수명에 도달하게 된다. 따라서 사용성에 지장을 줄 정도의 심각한 파괴상태의 도달 이전에 상용중인 콘크리트 포장슬래브의 구조적, 기능적 상태를 계속 유지하고 수명을 증진시키기 위하여 보수 및 보강등이 시급하다 하겠다. 콘크리트 포장슬래브의 구조적 강성이 심하게 저하된 경우에 선진외국의 경우에는 덧씌우기 보강방법이 가장 널리 사용되고 있는데 덧씌우기 보강두께 산정기법은 크게 역학적기법과 기능적기법으로 나뉘어진다. 따라서 현재 국내의 경우 기능적 평가기법에 관한 연구와 아울러 역학적기법에 대한 연구가 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 반복재하되는 교통하중에 의한 구조적파괴를 연구대상으로 하여 콘크리트 포장슬래브의 잔존수명을 추정하고 이에 따라 덧씌우기의 보강두께를 산정하는 역학적기법 및 이에 따른 전산기법을 개발하고 수치모델을 통하여 적용성 및 타당성을 분석하고자 한다.

## 2. 덧씌우기 보강두께 산정기법 및 비교분석

콘크리트 포장슬래브의 구조적 강성이 저하된 경우의 보강기법으로 널리 사용되고 있는 덧씌우기 보강에는 아스팔트와 콘크리트 덧씌우기의 두 가지로 크게 대별된다. 아스팔트 덧씌우기에는 얇은 덧씌우기(두께 5cm 이하)와 두꺼운 덧씌우기(두께 5cm 이상)로 분류되며, 콘크리트 덧씌우기는 강성이 저하된 기존의 콘크리트 표층과 덧씌우기 콘크리트층이 각각 부착(Bond), 분리(Unbond), 부분부착(Partial bond)된 경우로 분류된다. 콘크리트 포장슬래브의 덧씌우기 산정기법은 경험적기법, 비파괴시험 처짐치기법, 역학적기법등 크게 세가지로 구분된다.

경험적기법(Empirical procedure)은 콘크리트 포장슬래브의 파괴상태, 누적교통량, 기후등의 조건들을 경험적인 판단기준에 의하여 포장슬래브의 현상태를 판단하고 이 판단자료를 기초로 경험식에 의하여 필요한 덧씌우기 보강두께를 산정하는 방법이다. 대표적인 방법은 Illinois 와 AASHTO 설계방법

\* 정회원 · 경북대학 토목설계과 교수, 공학박사



등이 있다. 비파괴시험 처짐치기법(Deflection procedure)은 현장에서 비파괴시험장비(FWD, Dynaflect 등)에 의해 특정처짐을 측정하고 측정된 처짐치를 기초로 포장슬래브의 상태를 판정할 수 있는 각종 자료(교통량, 포장의 제원, 기후등)와의 상관관계에서 필요한 덧씌우기 보강두께를 산정하는 방법이다. 대표적인 방법은 Louisiana 와 Asphalt Institute 설계방법등이 있다. 역학적기법(Mechanistic procedure)은 수명이 저하된 기존의 콘크리트 포장슬래브의 구조적상태를 분석하기 위하여 비파괴시험에 의해 포장체 여러지점의 처짐치 및 실험등에 의해 포장체 각층의 물성을 해석적인 방법으로 추정한다. 추정된 물성과 포장슬래브의 단면제원등으로 구조해석을 수행하여 콘크리트 포장슬래브의 최대 인장응력을 산정하고, 산정된 최대인장응력을 인장응력의 함수형태로 개발된 파괴기준식에 대입하여 현 포장슬래브의 잔존수명을 추정한다. 그리고 덧씌우기 보강후의 기대되는 예상 교통량과 앞에서 추정된 잔존수명의 차이를 대상으로 덧씌우기 보강두께를 산정하는 기법이다. 대표적인 방법으로는 POD 와 OAR 설계방법등이 있다. 경험적기법에 의한 방법은 비교적 간단하고 빠른 시간내에 덧씌우기 설계를 수행할 수 있는 장점이 있으나 기술자의 경험적 판단과 오랜 기간 축적된 자료 및 경험식 등에 의존해야 하는 단점이 있다. 비파괴시험 처짐치기법은 현장에서 직접 처짐을 측정한 자료를 활용함으로써 기술자의 판단이나 경험식에 의한 방법보다 좀 더 객관적이고 과학적인 장점이 있으나 비파괴 시험에 의한 특정 처짐치로 포장슬래브 구조전체의 구조적, 기능적 상태를 판단해야 하는 단점이 있다. 역학적 기법은 기술자의 경험적 판단이나 특정 처짐치만을 이용하지 않고 포장슬래브 각 층의 물성 및 각종 처짐치를 기초로 해석적방법에 의하여 평가하므로 가장 과학적인 방법인 장점이 있다. 그러나 포장슬래브 각 층의 물성을 정확하게 추정하기 위해 정도 높고 효율적인 추정기법 즉 역산기법과 잔존수명 추정을 위한 파괴기준이 요구된다.

이와 같은 사항들을 종합적으로 비교분석하여 볼 때 경험적 판단이나 비파괴시험에 의한 처짐치를 이용한 방법은 특정 지역에 맞게 도포나 경험식등을 개발하여 사용하므로 그 지역의 상태를 고려한 간단한 덧씌우기 설계에는 유리하게 된다. 그러나 국내의 경우에는 콘크리트 포장슬래브에 관한 이러한 기초자료가 충분히 축적되어 있지 않다 하겠다. 따라서 현재 외국에서 최근에 개발 발전시키고 있는 역학적 기법은 국내의 경우 콘크리트 포장슬래브에 대한 정도 높은 구조해석기법 및 물성추정을 위한 역산기법 그리고 국내의 콘크리트 포장슬래브에 적합한 파괴기준이 확보된다면 역학적 기법을 이용한 덧씌우기 산정기법이 타당성 있고 국내실정에 맞는 덧씌우기 산정기법이라고 판단된다.

### 3. 역학적기법에 의한 덧씌우기 보강두께 산정 전산기법의 개발

본 연구에서는 역학적기법에 의하여 덧씌우기 보강두께를 산정하는 전산기법을 다음과 같이 개발하였다. 먼저 본 연구에서는 콘크리트 덧씌우기로 연구를 제한한다. 콘크리트 덧씌우기에는 콘크리트 포층과 덧씌우기 콘크리트층이 완전히 부착되거나 분리된 경우로 크게 분류된다. 그러나 최근의 연구결과로는 기존의 포장슬래브가 완전히 심하게 파괴된 경우에는 덧씌우기 두께가 비교적 두꺼운 분리된 덧씌우기 즉 재포장의 개념으로 보고, 기존 포장슬래브가 구조적강성이 저하되었으나 공용성을 유지하며 약간의 잔존수명을 가지고 있는 경우에는 분리된 덧씌우기보다는 부착된 덧씌우기가 더 효율적이라고 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서는 포장체가 심하게 파괴된 경우는 재포장을 하는 것으로 가



정하고, 덧씌우기 보강은 부착된 경우를 대상으로 하였다. 그림 1 은 콘크리트 포장슬래브의 덧씌우기 보강전후의 구조해석 단면인데, 구조해석기법으로는 콘크리트 슬래브는 유한 판요소로 기초는 Burmister 다층탄성이론으로 모형화하는 조합 유한요소해석을 적용하여 구조해석을 수행하였다. 4 개의 층으로 이루어진 콘크리트 포장슬래브는 가설후 시간이 경과되어 덧씌우기를 수행할 경우에 빈 배합 콘크리트층은 어느 정도 파괴가 진행되어 구조적 기능이 저하되어 하나의 콘크리트층으로서의 강성을 유지하지 못하게 된다. 그러나 강성이 저하되더라도 상대적으로 좋은 보조기층으로서의 강성을 지니게 되므로 좋은 보조기층의 물성으로 가정하여 해석하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 ARE에서 제안된 방법으로 ARE에서는 덧씌우기 후의 빈배합 콘크리트층의 탄성계수를 좋은 보조기층의 탄성계수인 5000 kgf/cm<sup>2</sup>로 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서는 덧씌우기 후 기존의 빈배합 콘크리트층은 좋은 보조기층 재료로 가정하여 구조해석을 수행하였다.

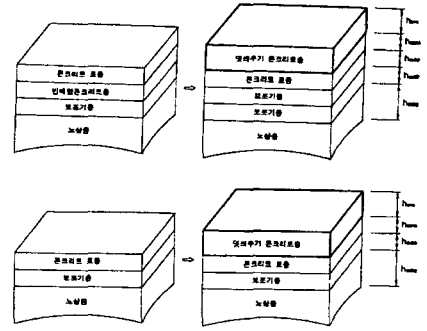


그림 1. 덧씌우기 보강전후의 구조해석 단면

본 연구에서 개발한 덧씌우기 보강설계 전산기법의 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 콘크리트 포장슬래브의 설계 단면, 구조제원 및 각층의 탄성계수, 덧씌우기 콘크리트의 탄성계수등에 따라 전술한 조합 유한요소해석에 의해 콘크리트 표층하부의 최대 인장응력을 산출하고 이에따라 파괴기준식에 의해 현 포장슬래브의 잔존수명을 산정한다. 그 다음 현 포장슬래브의 추정된 잔존수명이 덧씌우기 보강후의 요구되는 예상교통량과 비교하여 적은 경우에는 덧씌우기 보강두께 산정 과정으로 들어가서 초기 덧씌우기 보강두께를 산정한다. 다음에 초기 덧씌우기 보강 단면에 대해 구조해석을 수행하여 콘크리트 표층하부의 최대 인장응력과 예상교통량에 따라 파괴기준식에 의하여 산정된 소요 인장응력을 비교하여 그 차가 허용오차내에 들때까지 반복적으로 수행하여 최종적인 덧씌우기 보강두께를 산정한다. 그림 2 는 이러한 덧씌우기 산정 전산기법의 흐름도이다.

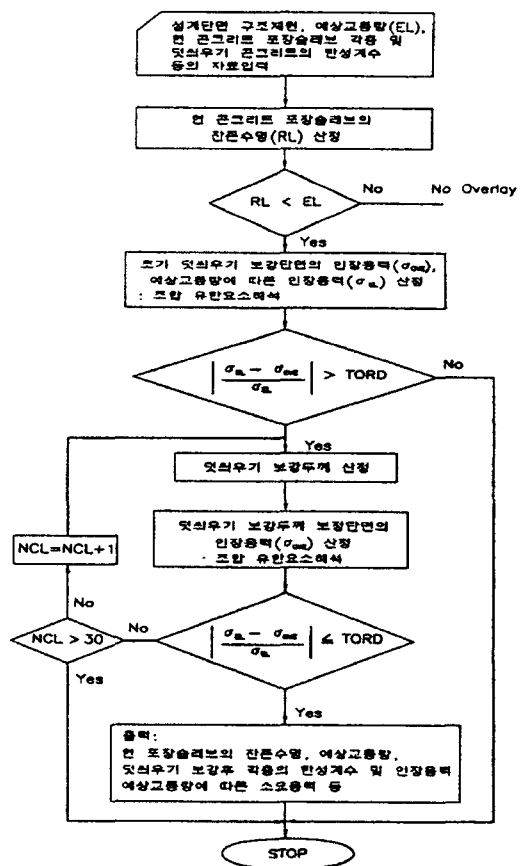


그림 2. 덧씌우기 산정 전산기법의 흐름도



#### 4. 수치모델에 의한 비교고찰

본 연구에서 개발한 덧씌우기 산정 전산프로그램을 국내에 가설되어 있는 콘크리트 포장슬래브의 대표적인 설계단면을 감안하여 표 1과 같은 구조체 단면을 설정하여 구조적강성이 저하된 경우를 가상하여 수치모델을 적용대상으로 하였다. 덧씌우기 콘크리트의 물성 즉 탄성계수는 국내의 콘크리트 포장슬래브 타설시 주로 사용되었던 설계기준강도를 고려한 콘크리트의 탄성계수인 250,000 kgf/cm<sup>2</sup> ( $\sigma_{ck} = 280 \text{ kgf/cm}^2$ )와 포아손 비는 0.15 를 사용하였다. 또한 각각의 설계단면에 대해 덧씌우기 후의 요구되는 예상통과교통량을 10,000,000 대의 8.2 tf 등가단축하중(ESAL : Equivalent Single Axle Load)으로 가정하여 덧씌우기 설계를 수행하였다. 표 2 와 표 3 은 3 층 구조의 콘크리트 포장슬래브의 설계단면인 A 형, B 형, C 형을 대상으로 수치모델에 대한 잔존수명 추정 및 덧씌우기 두께의 산정예이다. 표에서 잔존수명은 8.2 tf ESAL이고 덧씌우기 보강두께의 단위는 cm이다. 표 2 는 콘크리트 포장슬래브의 강성이 저하된 경우 즉, 포장슬래브 각 층의 탄성계수가 모두 저하된 경우(수치모델 1)이고, 표 3 은 콘크리트 표층의 탄성계수는 저하되었으나 보조기층 및 노상층은 덜 저하된 경우(수치모델 2)이다. 표에서 본 연구는 기존에 연구 발표한바 있는 파괴기준식을 적용한 것이다. 표 4 와 표 5 는 4 층 구조의 콘크리트 포장슬래브의 설계단면인 D 형, E 형, F 형을 대상으로 한 경우이다. 표 4 는 포장슬래브 각 층의 탄성계수가 모두 저하된 경우(수치모델 3)이고, 표 5 는 콘크리트 표층 및 빈배합 콘크리트층의 탄성계수는 저하되었으나 보조기층 및 노상층은 덜 저하된 경우(수치모델 4)이다.

각 설계단면별로 수치모델에 대해 수행한 잔존수명 추정 및 덧씌우기 보강두께 산정결과 3 층 구조의 콘크리트 포장슬래브의 설계단면중에서 설계단면 A형과 설계단면 B형에 비하여 설계단면 C형은 덧씌우기 전의 포장체의 단면이 얇으므로 잔존수명이 적으며 더 큰 덧씌우기 두께가 산정됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 4 층 구조의 콘크리트 포장슬래브의 설계단면인 경우도 경향이 같다. 즉 설계단면 D형과 E형 보다 포장체의 단면이 얇은 설계단면 F형의 경우가 잔존수명이 적으며 더 큰 덧씌우기 두께가 산정되었다. 또한 기존에 연구 발표한바 있는 파괴기준식에 의한 적용결과와 비교검토하기 위하여 전산기법내의 파괴기준식에 Taute(1981)와 Majidzadeh(1983)가 개발한 파괴기준식을 프로그램 내에 삽입하여 각 수치모델에 대한 잔존수명추정 및 덧씌우기 보강두께 산정결과를 각각 표시하였다. Taute식은 콘크리트 포장슬래브의 강성이 저하된 경우 즉 발생한 인장응력이 클수록 파괴까지의 교통량을 적게 추정하는 비교적 안전측으로 제안된 파괴기준식이고, Majidzadeh식은 같은 경우에 파괴까지의 교통량을 비교적 크게 추정하는 식이다. 표에서 보는바와 같이 본 연구에서 개발한바 있는 파괴기준식에 의해 추정된 잔존수명은 Taute식에 의해 추정된 결과보다 약간 크며 Majidzadeh식에 의해 추정된 결과보다는 적다. 따라서 산정된 덧씌우기 보강두께는 잔존수명에 반비례하므로 Taute식에 의해 산정된 결과보다는 약간 적으며 Majidzadeh식에 의한 결과보다는 큼을 알 수 있으며, 산정된 덧씌우기 보강두께의 차이는 3 층 및 4층 구조체 모두 포장구조체의 단면이 두꺼울수록 차이가 줄어들며 단면이 얇을수록 차이가 커진다. 이는 잔존수명이 포장구조체의 단면이 두꺼울수록 차이가 커지며 단면이 얇을수록 차이가 줄어들기 때문이다. 즉 덧씌우기 보강두께는 잔존수명과 반비례하기 때문이다. 따라서 본 연구결과 산정된 덧씌우기 보강두께와 잔존수명은 Taute식 및 Majidzadeh식에 의한 결과 중간에 위치하고 Taute식에 의한 결과에 근접한다. 따라서 본 연구결과의 적용성 및 타당성이 있다고 판단된다.



표 1. 콘크리트 포장슬래브의 설계단면(단위 : cm)

설계 단면	각 단면의 두께			
	콘크리트 표층	빈배합 콘크리트층	보조기층	노상층
A형	30	-	45	∞
B형	30	-	20	∞
C형	25	-	20	∞
D형	30	15	40	∞
E형	30	15	30	∞
F형	30	15	15	∞

표 2. 수치모델(1)의 잔존수명 및 덧씌우기 보강두께 비교

설계단면 형태	파괴기준식	잔존수명	덧씌우기 보강두께	보정횟수
1.설계단면 A형	본 연구	2,714,446	7.5	2회
	Taute식	2,290,026	10.8	6회
	Majidzadeh식	5,934,131	2.3	6회
2.설계단면 B형	본 연구	2,542,410	7.5	2회
	Taute식	2,169,401	11.2	3회
	Majidzadeh식	5,492,262	2.3	6회
3.설계단면 C형	본 연구	956,689	12.7	6회
	Taute식	967,240	16.4	6회
	Majidzadeh식	1,730,212	7.0	6회

표 3. 수치모델(2)의 잔존수명 및 덧씌우기 보강두께 비교

설계단면 형태	파괴기준식	잔존수명	덧씌우기 보강두께	보정횟수
1.설계단면 A형	본 연구	2,814,481	7.0	6회
	Taute식	2,359,553	10.8	6회
	Majidzadeh식	6,193,438	1.9	4회
2.설계단면 B형	본 연구	2,642,353	7.5	2회
	Taute식	2,239,643	10.8	6회
	Majidzadeh식	5,748,322	2.3	6회
3.설계단면 C형	본 연구	996,996	12.7	6회
	Taute식	1,000,798	15.9	5회
	Majidzadeh식	1,816,690	7.0	6회

표 4. 수치모델(3)의 잔존수명 및 덧씌우기 보강두께 비교

설계단면 형태	파괴기준식	잔존수명	덧씌우기 보강두께	보정횟수
1.설계단면 D형	본 연구	2,792,129	8.4	5회
	Taute식	2,334,056	12.2	5회
	Majidzadeh식	6,135,351	2.8	5회
2.설계단면 E형	본 연구	2,788,862	8.4	5회
	Taute식	2,341,789	12.2	5회
	Majidzadeh식	6,126,868	3.3	6회
3.설계단면 F형	본 연구	2,674,439	12.2	5회
	Taute식	2,262,096	15.9	5회
	Majidzadeh식	5,830,906	6.1	6회

표 5. 수치모델(4)의 잔존수명 및 덧씌우기 보강두께 비교

설계단면 형태	파괴기준식	잔존수명	덧씌우기 보강두께	보정횟수
1.설계단면 D형	본 연구	3,623,785	4.7	5회
	Taute식	2,907,662	8.4	5회
	Majidzadeh식	8,349,357	0.2	7회
2.설계단면 E형	본 연구	3,514,316	7.0	6회
	Taute식	2,834,878	10.3	5회
	Majidzadeh식	8,052,103	1.9	4회
3.설계단면 F형	본 연구	3,442,770	7.5	2회
	Taute식	2,787,095	11.3	3회
	Majidzadeh식	7,858,730	2.3	6회



## 5. 결 론

본 연구에서는 반복재하되는 교통하중에 의한 구조적파괴를 연구대상으로 하여 콘크리트 포장슬래브의 구조적 보강기법인 덧씌우기의 보강두께를 산정하는 역학적기법과 이에 따른 전산기법 및 적용성에 대해 연구하였다. 즉 유한요소 해석기법을 적용하여 예상 통과교통량에 따른 소요응력과 덧씌우기 보강후의 응력의 차가 허용범위내에 들 때까지 반복보정하여 덧씌우기 보강두께를 산정하는 역학적 기법의 알고리즘을 도출하고 이를 전산화 하였으며, 국내에 가설되어 있는 콘크리트 포장슬래브의 대표적인 설계단면을 대상으로 구조적 강성이 저하된 경우의 수치모델을 통하여 적용성을 분석하였다. 따라서 본 연구결과는 국내실정에 맞는 타당성 있고 효율적인 덧씌우기 보강두께 산정방법이라고 판단되며 강성이 저하된 콘크리트 포장슬래브의 역학적 평가 및 효율적인 덧씌우기 보강 대책수립에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 참고문헌

1. Majidzadeh, K. and Ilives G.J., "Evaluation of Rigid Pavement Overlay Desgin Procedure. Development of the OAR Procedure," FHWA/RD-83/090, Office of Research and Development Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation Washington, D.C., December 1983.
2. Taute, A., McCullough B.F., and Hudson W.R., "Improvements to the Material Characterization Fatigue Life Prediction Methods of the Texas Rigid Pavement Overlay Design Procedure," Research Report 249-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, March 1981.